

УДК 62-50

Ловейкін В.С., д.т.н.; Голдун В.А.; Ромасевич Ю.О., д.т.н.

Національний університет біоресурсів і природокористування

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПІДЙОМУ І ОПУСКАННЯ ВАНТАЖУ ЗА ОПТИМАЛЬНИМИ ЗАКОНАМИ

Анотація. Наведено результати експериментальних досліджень режимів підйому та опускання вантажу за оптимальними законами. Знайдено регресійні залежності, які описують максимальні зусилля у канаті та максимальні прискорення кранового моста в залежності від маси вантажу та тривалості переходу від посадочної швидкості руху вантажу до номінальної і навпаки. Встановлено, що використання оптимальних режимів руху механізму підйому вантажу дозволяє зменшити небажані динамічні навантаження у елементах крана і не супроводжується значним подовженням тривалості циклу підйому-опускання вантажу.

Ключові слова: підйом вантажу, експериментальні дослідження, оптимальні режими руху, динамічні навантаження, регресійний аналіз.

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований режимов подъема и опускания груза по оптимальным законам. Найдены регрессионные зависимости, которые описывают максимальные усилия в канате и максимальные ускорения кранового моста в зависимости от массы груза и продолжительности перехода от посадочной скорости движения груза к номинальной и наоборот. Установлено, что использование оптимальных режимов движения механизма подъема груза позволяет уменьшить нежелательные динамические нагрузки в элементах крана и не сопровождается значительным увеличением продолжительности цикла подъема-опускания груза.

Ключевые слова: подъем груза, экспериментальные исследования, оптимальные режимы движения, динамические нагрузки, регрессионный анализ.

Abstrakt. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen von Moden Heben und Senken der optimalen Gesetze. Gefunden Regressionsabhängigkeit, die die besten Bemühungen in dem Seil und der maximalen Beschleunigung des Brückenkrans zu beschreiben, in Abhängigkeit vom Gewicht der Last und die Dauer des Übergangs von der Landegeschwindigkeit auf die Nennlast, und umgekehrt. Es wurde festgestellt, dass die Verwendung der besten Ausführungsarten der

Bewegung Hubmechanismus verringert unerwünschte dynamische Lasten in die Kranelemente und nicht durch eine signifikante Erhöhung der Zyklus Anheben.

***Stichwort:** Anheben der Last, experimentelle Studien, die optimalen Bewegungsarten, dynamische Belastung, Regressionsanalyse.*

Постановка проблеми.

Прольотні крани (мостові та козлові) отримали значне поширення у металургії, машинобудуванні, легкій промисловості, сільському та лісовому господарстві, будівництві. При виконанні навантажувально-розвантажувальних робіт у випадку сумісної роботи прольотного крана та транспортного засобу у обох машинах виникають значні динамічні навантаження. Вони додатково навантажують транспортний засіб і вантажопідйомний кран, що є небажаним оскільки знижується їх надійність. Знизити рівень динамічних навантажень можливо завдяки внесенню змін до конструкції механізму (введення пружних муфт, гасителів коливань тощо) або змінити зовнішній силовий вплив з боку електродвигуна. Другий спосіб є більш універсальним, оскільки він може враховувати змінні параметри навантажувально-розвантажувальних процесів (вагу вантажу, його конфігурацію, довжину гнучкого підвісу, положення вантажного візка на крановому мості тощо). Крім того, він дає змогу реалізувати оптимальні закони керування механізмом підйому вантажу за яких енергетичні, динамічні, кінематичні та інші показники роботи крана підвищуються.

У роботах [1, 2] знайдено оптимальні режими руху системи „механізм підйому вантажу – вантаж – транспортний засіб”. Для оцінки ефективності їх використання необхідно провести експериментальні дослідження динаміки руху механізму підйому вантажу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Синтез оптимальних за різними критеріями законів руху механізму підйому вантажу виконаний у багатьох роботах. У роботі А.О. Смєхова і М.І. Єрофєєва [3] знайдено оптимальний закон руху механізму підйому вантажу при суміщенні операцій підйому вантажу та переміщення візка крана. В роботі [4] Р.П. Герасимьяка і В.А. Лещєва досліджено динаміку багатомасових систем з електроприводом. На основі проведених досліджень авторами встановлено оптимальне значення жорсткості механічної характеристики електроприводу, за якого відбувається максимальне демпфування пружних коливань у системі. Ці результати можна використати для зменшення динамічних навантажень у канаті при підйомі вантажу. У праці [5] Г.В. Шумілова за інтегральним оптимізаційним критерієм знайдено закон руху механізму підйому вантажу баштового крана для випадку руху вантажу

„з вісу”. Для знаходження оптимального закону руху було використано варіаційне числення. Дослідження оптимальних законів руху механізму підйому вантажу приведено у монографії В.С. Ловейкіна, Ю.В. Човнюка, М.Г. Діктерука та С.І. Пастушенка [6]. На відміну від попередніх праць у цій роботі на основі варіаційного числення автори знайшли оптимальне керування при врахуванні розподілених параметрів вантажного канату. У дисертаційній роботі С.В. Демідаса [7] із використанням варіаційного методу визначено закон руху механізму підйому вантажу баштового крана, який мінімізує „енергію” ривків, яка пропорційна третій похідній функції положення вантажу за часом. Автором встановлено, що реалізація оптимального закону руху механізму підйому вантажу у режимі підйому „з підхватом” дозволяє зменшити амплітуду коливань зусилля у канаті у 1,6 разів, а внутрішні напруження у розкосі корінної стріли у 2,5 рази в порівнянні з некерованим режимом пуску. У роботі [8] на основі багатоетапної математичної моделі руху механізму підйому вантажу знайдені оптимальні закони переміщення окремих зосереджених мас системи. Використані у роботах [3-8] критерії є лінійними, вони лише опосередковано відображають енергетичні та динамічні показники роботи приводу, які значно впливають на ефективність роботи механізму підйому вантажу. Крім того, у багатьох роботах не наведено результати експериментальних досліджень при роботі механізму підйому вантажу за оптимальними законами.

Постановка мети та задач дослідження.

Провести аналіз експериментальних даних при підйомі та опусканні вантажу за оптимальним законом. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі: 1) провести попередню обробку експериментальних даних для визначення характеру зміни динамічних показників роботи механізму підйому вантажу; 2) із використанням регресійного аналізу встановити залежність максимальних динамічних навантажень від параметрів механізму підйому вантажу та швидкості переходу між посадочною та номінальною швидкостями руху вантажу.

Виклад основного матеріалу.

Всі експериментальні дослідження проведені на мостовому крані вантажопідйомністю 3,2 тони. За допомогою теорії подібності [9] результати експериментальних досліджень відповідним чином оброблені так, що їх можна використати для мостового крана вантажопідйомністю 20 тон, який використаний у теоретичних розрахунках [1, 2].

Для режиму підйому вантажу при реалізації оптимальних характеристик зміни швидкості приводу (при розгоні та гальмуванні) проведено 15 дослідів. При цьому у кожному досліді виміряно: зусилля у канаті, кутуову швидкість руху канатного барабана та прискорення

кранового моста. Наведемо графіки виміряних фізичних величин (рис. 1) для експерименту, в якому досліджено підйом вантажу масою 19872 кг при тривалості зміни швидкості приводу механізму підйому вантажу, яка рівна 1,8 секунд. На рис. 1 сіра лінія відповідає теоретично розрахованій характеристикам, а чорні точки показують експериментальні дані.

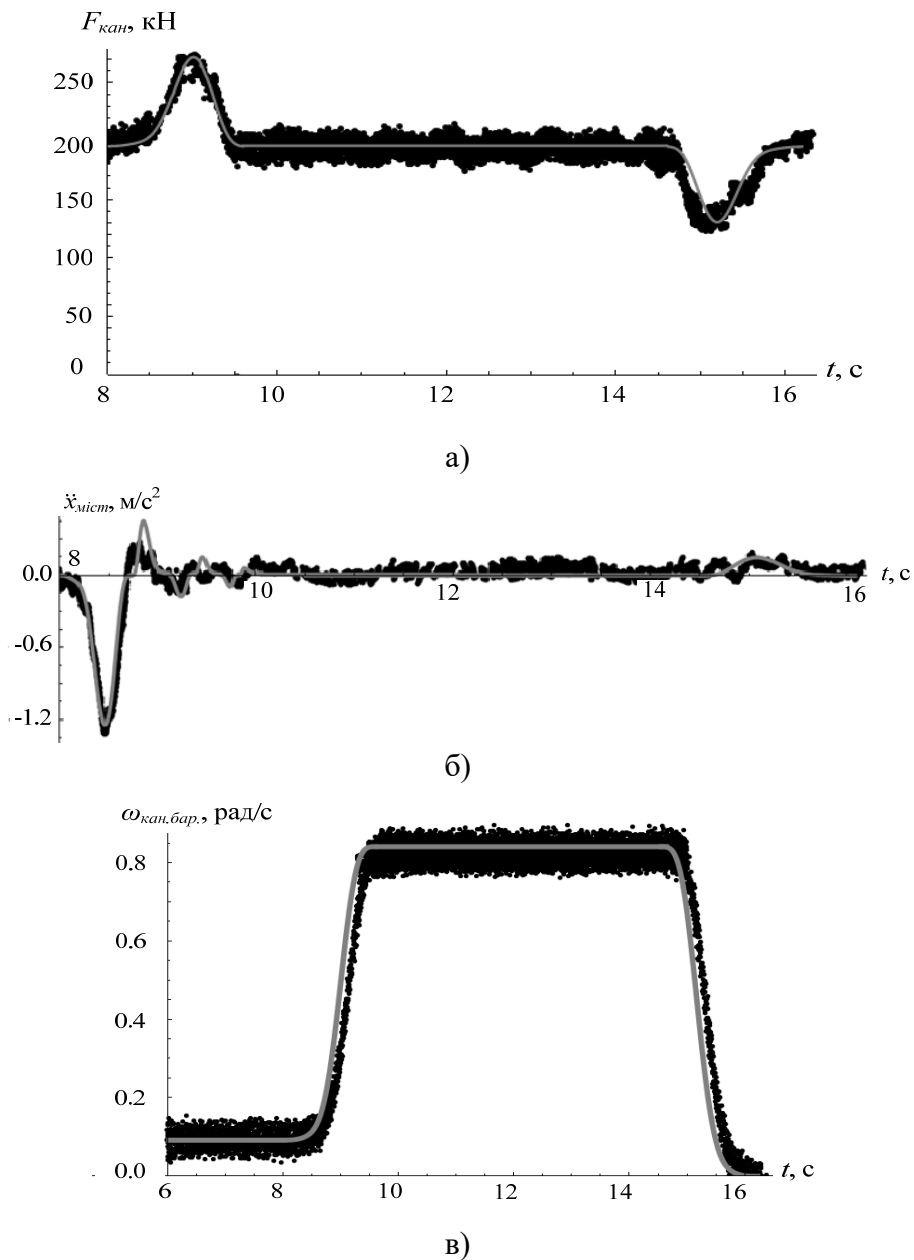


Рисунок 1 – Графіки кінематичних та динамічних параметрів при підйомі вантажу: а) зусилля у канаті; б) прискорення кранового моста; в) кутова швидкість руху канатного барабана

Аналіз графіків, які представлені на рис. 1 показує, що найбільше значення зусилля у канаті виникає у моменту часу 9 сек і становить 272 кН. Експериментальні дані, які отримані при проведенні інших дослідів вказують на те, що подовження тривалості переходу між швидкостями руху канатного барабану до 8 сек зменшує це значення до 231 кН. Для аналізу всіх отриманих експериментальних даних застосуємо регресійний аналіз [10]. Нагадаємо, що незалежними факторами у дослідях були маса вантажу та тривалість зміни швидкості підйому/опускання вантажу (при переході від посадочної до усталеної). Для проведення регресійного аналізу задамо модель залежності максимального зусилля у канаті:

$$F_{кан}^{max} = a_0 + a_1 m_{вант} + a_2 T m_{вант} + a_3 T^3 m_{вант} + a_4 T m_{вант}^3, \quad (1)$$

та максимального прискорення кранового моста:

$$\ddot{x}_{міст.}^{max} = b_0 + b_1 T + b_2 T m_{вант} + b_3 T^2 m_{вант} + b_4 T^3 m_{вант} + b_5 T^2 m_{вант}^2, \quad (2)$$

де $a_0 \dots a_4$ – параметри регресійної моделі для максимального зусилля у канаті;

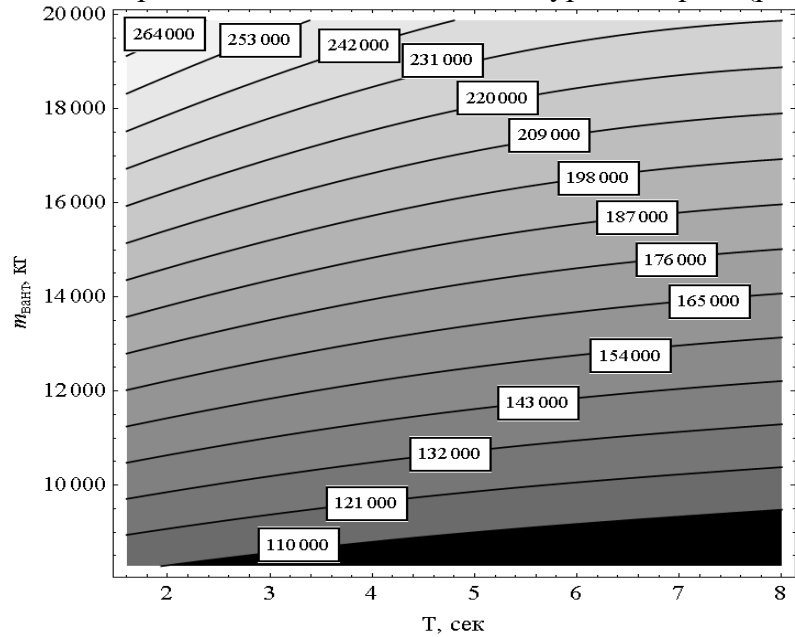
$b_0 \dots b_5$ – параметри регресійної моделі для максимального прискорення кранового моста. У моделях (1)-(2) виключені ті коефіцієнти, які є статистично незначущими. У таблиці 1 наведено результати розрахунку статистичних показників для моделей (1)-(5.2).

Таблиця 1 – Статистичні показники регресійних функцій (1)-(2)

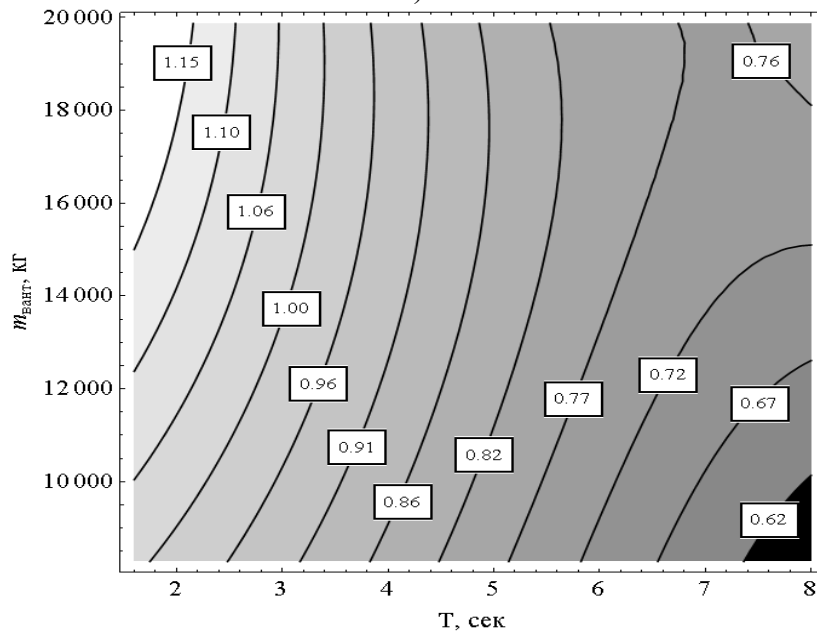
Коефіцієнти регресійної моделі	Значення статистичних показників		
	Оцінка коефіцієнта	Стандартна похибка	Критерій Стьюдента
Максимальне значення зусилля у канаті $F_{кан}^{max}$			
a_0	$-5,09 \cdot 10^2$	$5,99 \cdot 10^{-6}$	$-8,49 \cdot 10^8$
a_1	$1,49 \cdot 10^1$	$9,99 \cdot 10^{-2}$	$1,49 \cdot 10^2$
a_2	$-5,16 \cdot 10^{-1}$	$3,71 \cdot 10^{-3}$	$-1,38 \cdot 10^1$
a_3	$3,12 \cdot 10^{-3}$	$3,96 \cdot 10^{-5}$	$7,87 \cdot 10^0$
a_4	$-1,75 \cdot 10^{-10}$	$4,47 \cdot 10^{-12}$	$-4,13 \cdot 10^0$
Максимальне прискорення кранового моста $\ddot{x}_{міст.}^{max}$			
b_0	$1,19 \cdot 10^0$	$2,71 \cdot 10^{-1}$	$4,34 \cdot 10^1$
b_1	$-1,31 \cdot 10^0$	$1,01 \cdot 10^{-1}$	$-1,32 \cdot 10^1$
b_2	$1,39 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$1,28 \cdot 10^1$
b_3	$-1,46 \cdot 10^{-4}$	$4,10 \cdot 10^{-6}$	$-3,58 \cdot 10^0$
b_4	$1,66 \cdot 10^{-5}$	$2,56 \cdot 10^{-7}$	$6,47 \cdot 10^0$
b_5	$-4,91 \cdot 10^{-9}$	$6,09 \cdot 10^{-11}$	$-8,05 \cdot 10^0$

Для розрахованих регресійних функцій були знайдені коефіцієнти детермінації, які рівні: 0,9999 – для виразу (1); 0,9995 – для

виразу (2). Ці значення близькі до одиниці, що вказує на те, що параметри моделей (1)-(2) оцінені досить точно. Всі розрахунки приведені для довірчої ймовірності 0,99. Для графічного представлення отриманих даних наведемо контурні поверхні (рис. 2).



а)



б)

Рисунок 2 – Контурні поверхні регресійних функцій (1)-(2):
а) максимального зусилля у канаті; б) максимального прискорення
кранового моста

Аналіз графіків, які наведені на рис. 2, показує, що на величини $\ddot{x}_{міст.}^{max}$ та $F_{кан}^{max}$ мають вплив обидва незалежні фактори (маса вантажу $m_{вант}$ та тривалість переходу від посадочної швидкості руху вантажу до номінальної T). Величина $F_{кан}^{max}$ значно залежить від маси вантажу. При будь-якому фіксованому значенні маси вантажу збільшення фактора T призводить до зменшення величини $F_{кан}^{max}$.

Порівняння отриманих даних при оптимальному керуванні та при прямому пуску приводу показує, що значне зниження максимального зусилля у канаті досягається лише при $T > 4$ сек. Наприклад, при $T=4,8$ сек цей показник зменшується на 15,4% у порівнянні з режимом прямого пуску приводу. Максимальне прискорення кранового моста зменшується у 4,66 рази, що пояснюється плавністю руху приводу механізму підйому вантажу при реалізації оптимального керування.

Для режиму опускання вантажу при оптимальному переході від номінальної швидкості до посадочної необхідно встановити характер зміни зусилля у канаті, прискорення кранового моста та вантажу при варіації незалежних факторів.

Для експериментальних даних, які отримані при проведенні дослідів по опусканню вантажу із реалізацією оптимальних законів руху знайдено регресійні функції, які апроксимують максимальні значення зусилля у канаті та максимальне прискорення кранового моста. Регресійна модель для максимального зусилля у канаті представляється у наступному вигляді:

$$F_{кан}^{max} = c_0 + c_1T + c_2m_{вант} + c_3Tm_{вант} + c_4T^2m_{вант} + c_5T^2m_{вант}^2 + c_6Tm_{вант}^3, (3)$$

для максимального прискорення кранового моста:

$$\ddot{x}_{міст.}^{max} = d_0 + d_1T + d_2m_{вант} + d_3T^2 + d_4T^2m_{вант} + d_5T^2m_{вант}^2 + d_5Tm_{вант}^3, (4)$$

де $c_0...c_6$ – параметри регресійної моделі для максимального зусилля у канаті;

$d_0...d_5$ – параметри регресійної моделі для максимального прискорення кранового моста.

У виразах (3)-(4) записано лише статистично значимі коефіцієнти. Розраховані параметри регресійних моделей наведені у таблиці 2. Для регресійних функцій (3)-(4) розраховані коефіцієнти детермінації, які рівні: 0,9916 – для виразу (3); 0,9990 – для виразу (4), що вказує на те, що параметри моделей (3)-(4) оцінені досить точно. Наведені результати статистичних розрахунків справедливі для довірчої ймовірності 0,99.

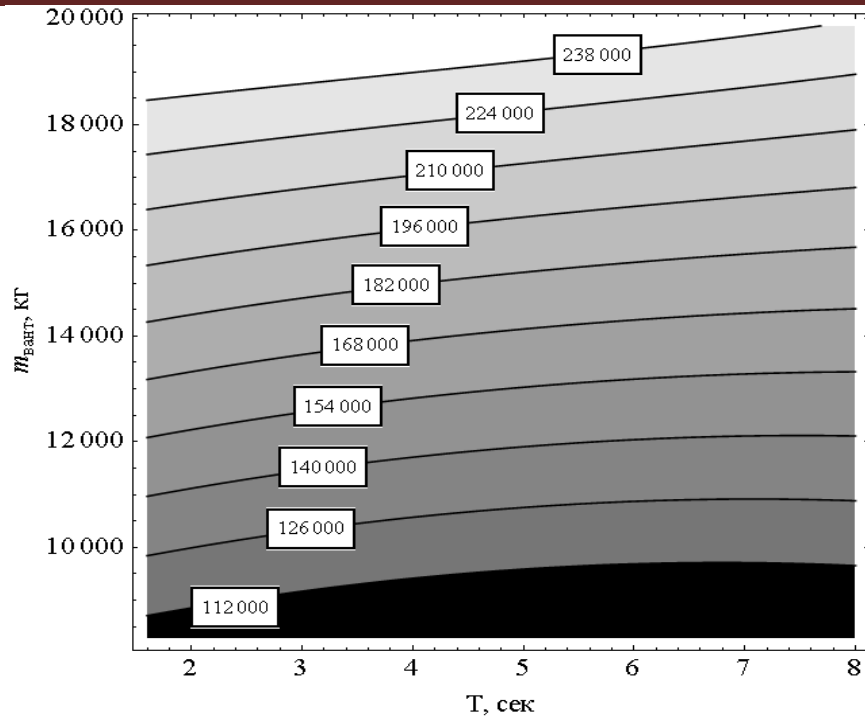
Таблиця 2 – Статистичні показники регресійних функцій (3)-(4)

Коефіцієнти регресійної моделі	Значення статистичних показників		
	Значення коефіцієнта	Стандартна похибка	Критерій Стьюдента
Максимальне значення зусилля у канаті $F_{кан}^{max}$			
c_0	$1,12 \cdot 10^3$	$1,39 \cdot 10^2$	$8,05 \cdot 10^1$
c_1	$-2,80 \cdot 10^3$	$5,30 \cdot 10^2$	$-5,28 \cdot 10^0$
c_2	$1,25 \cdot 10^1$	$1,04 \cdot 10^{-1}$	$1,19 \cdot 10^2$
c_3	$-0,48 \cdot 10^0$	$7,80 \cdot 10^{-2}$	$-6,09 \cdot 10^0$
c_4	$9,98 \cdot 10^2$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	$7,95 \cdot 10^0$
c_5	$-5,42 \cdot 10^{-6}$	$6,68 \cdot 10^{-7}$	$-8,11 \cdot 10^0$
c_6	$1,34 \cdot 10^{-9}$	$1,41 \cdot 10^{-10}$	$9,54 \cdot 10^0$
Максимальне прискорення кранового моста $\ddot{x}_{міст.}^{max}$			
d_0	$9,58 \cdot 10^{-1}$	$3,47 \cdot 10^{-3}$	$2,76 \cdot 10^2$
d_1	$-5,33 \cdot 10^{-2}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$	$-4,02 \cdot 10^0$
d_2	$2,15 \cdot 10^{-5}$	$2,62 \cdot 10^{-6}$	$8,22 \cdot 10^0$
d_3	$-1,22 \cdot 10^{-5}$	$1,96 \cdot 10^{-6}$	$-6,21 \cdot 10^0$
d_4	$1,35 \cdot 10^{-6}$	$3,13 \cdot 10^{-7}$	$4,29 \cdot 10^0$
d_5	$-4,98 \cdot 10^{-11}$	$1,67 \cdot 10^{-11}$	$-2,98 \cdot 10^0$
d_6	$2,04 \cdot 10^{-14}$	$3,53 \cdot 10^{-15}$	$5,78 \cdot 10^0$

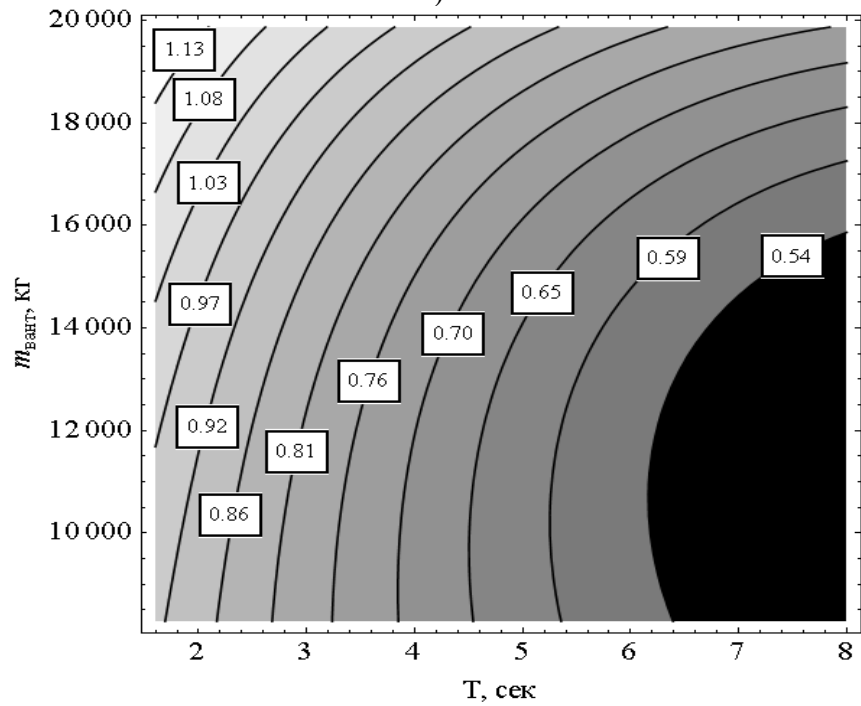
Графічну інтерпретацію розрахованих моделей (3)-(4) наведено на рис. 3.

Аналіз графіків, які наведені на рис. 3, показує, що збільшення тривалості переходу між швидкостями підйому вантажу (від посадочної до номінальної і навпаки) зумовлює зменшення максимальних прискорень кранового моста та вантажу як при опусканні так і при підйомі. Звичайно, при цьому збільшується тривалість циклу по підйому/опусканню вантажу.

На основі аналізу експериментальних даних встановлено, що при збільшенні T до значення 4,8 сек значно зменшуються небажані динамічні показники і при цьому тривалість циклу підйому/опускання зростає незначно. Наприклад, максимальне зусилля у канаті зменшується на 13,8%, максимальне прискорення кранового моста зменшується у 3,76 рази в порівнянні з прямим пуском приводу.



а)



б)

Рисунок 3 – Котурні поверхні регресійних функцій (3)-(4):
а) максимального зусилля у канаті; б) максимального прискорення
кранового моста

Висновки. На основі регресійного аналізу знайдено вирази, які описують залежність максимальних значень зусилля у канаті та кранового моста від маси вантажу $m_{вант}$ та тривалості переходу між номінальною та посадочною швидкостями підйому (опускання) вантажу T . Аналіз знайдених виразів виявив, що величини небажаних динамічних показників значно залежать від величини T . Наприклад, для $T=4,8$ сек максимальне зусилля у канаті при підйомі вантажу зменшується на 15,4% (на 13,8% для опускання); максимальне прискорення кранового моста зменшується у 4,66 рази (у 3,76 рази для опускання) у порівнянні з рухом механізму підйому вантажу, який відбувається при роботі приводного двигуна на природній механічній характеристиці. Подальше збільшення тривалості переходу між номінальною та посадочною швидкостями підйому (опускання) вантажу не призводить до значного зменшення небажаних динамічних показників роботи системи. Зниження прискорень кранового моста та вантажу пояснюється плавністю руху приводного механізму при реалізації оптимального керування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ловейкін В.С. Моделювання оптимальних режимів підйому та опускання вантажу / В.С. Ловейкін, В.А. Голдун // Збірник наукових праць „Машинобудування”. – 2014. – 14. – С. 15-23.
2. Ловейкін В.С. Оптимізація режиму підйому вантажу з транспортного засобу / В.С. Ловейкін, В.А. Голдун // Збірник тез доповідей 75 науково-практичної конференції Київського національного університету будівництва і архітектури (15-18 квітня 2014 року) / Кафедра основ професійного навчання Київського національного університету будівництва і архітектури. – К. 2014. – С. 28-30.
3. Смехов А.А. Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами / А.А. Смехов, Н.И. Ерофеев. – М.: Машиностроение, 1975. – 239 с.
4. Герасимьяк Р.П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р.П. Герасимьяк, В.А. Лещёв. – Одесса.: СМІЛ, 2008. – 192 с.
5. Шумілов Г.В. Оптимізація режиму зміни вильоту і підйому вантажу баштового крану: дис. канд. техн. наук. 05.05.05 / Георгій Володимирович Шумілов. – К., 2013. – 210 с.
6. Моделювання динаміки механізмів вантажопідйомних машин / [Ловейкін В.С., Човнюк Ю.В., Діктерук М.Г., Пастушенко С.І.]. – К.-Миколаїв: РВВ МДАУ, 2004. – 286 с.
7. Демідас С.В. Мінімізація динамічних навантажень в елементах баштового крана на основі оптимізації режиму руху механізма

-
- підйому: дис. канд. техн. наук. 05.05.05 / Сергій Васильович Демідас. – К., 2000. – 179 с.
8. Ромасевич Ю.О. Динамічна оптимізація режимів руху механізмів вантажопідйомних машин як мехатронних системи: дис. докт. техн. наук. 05.05.05 / Юрій Олександрович Ромасевич. – О., 2015. – 519 с.
 9. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1977. – 440 с.
 10. Радченко С.Г. Методология регрессионного анализа / С.Г. Радченко. – К.: Корнийчук, 2011. – 376 с.